

机载 SAR 重复轨道干涉成像试验结果¹

师瑞荣 荆麟角 宋福明 沈汀 李建雄

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘要 该文描述了中科院电子所机载 L-SAR 系统的重复轨道干涉试验。通过对得到的观测数据进行处理和分析,得到了中国第一幅与实际地形图基本吻合的数字高程图,高程精度在 10m 左右。同时,该文提出一种适用于轨道有夹角的图像配准方法,并在处理过程中验证了算法的有效性。

关键词 合成孔径雷达,干涉,重复轨道,数字高程模型,图像配准

中图分类号 TN951

1 引言

通过干涉 SAR 获得数字高程模型是遥感领域的研究热点之一,受到世界各国研究人员的重视。迄今为止对机载干涉成像的研究主要集中于双天线干涉。1974 年 Graham 利用机载双天线模拟 SAR 系统干涉得到地形高度图像^[1],揭开对机载干涉 SAR 成像研究的序幕。1986 年, Zerber 等人在理论和实践上对干涉 SAR 进行了完善和发展,研制出首部数字式干涉雷达,高程精度在 10m 以下^[2]。1991 年双天线雷达地形测绘系统 TOPSAR,工作在 C 波段,其结果空间分辨率为 10m,高程精度达到了 2-3m^[3]。1994 年,欧洲第一次机载双天线 DO-SAR 系统进行干涉试验,结果水平分辨率为 0.8m,绝对高程精度为 2-5m^[4]。1998 年 C. Wimmer 等人利用高分辨率 AeS-1 机载双天线雷达对 Wadden 地区进行测绘,结果的水平分辨率为 2.5m,高程精度为 5cm^[5]。

同机载双天线干涉研究相比,由于大气的扰动,使得载机飞行稳定性变差,机载单天线重复轨道干涉研究很少。1990 年,加拿大 CCRS 利用 C/X-SAR 系统进行单天线重复轨道的干涉试验,对运动补偿算法和时间相干性作了研究^[6]。1997 年 8 月德国宇航中心利用装在 Do-228 上的 ESAR 作单天线重复轨道干涉试验,获得了 L 波段和 P 波段的干涉相位和相关系数图像^[7]。但都未见到相应的地面高程图。

在我国,由于缺乏相应的干涉合成孔径雷达系统,对干涉成像的研究尚处于起步阶段。在 2000 年 10 月,中国科学院电子学研究所利用现有 L-SAR 系统进行了机载重复轨道干涉试验,经过对大量飞行数据的分析处理,根据机载飞行特点对图像的配准做了改进,最终得到和实际地形图基本符合的三维高程图。

2 L-SAR 系统参数

L-SAR 系统是中科院电子所自行研制的机载 SAR 系统。其工作参数如表 1 所示。

表 1 L-SAR 系统参数

参数	典型值
信号波长 λ (m)	0.24
信号带宽 B (MHz)	61.6
距离向采样率 f_s (MHz)	66.67
脉冲重复频率 PRF(Hz)	800-1200
天线尺寸 $D_t \times D_r$ (m)	1.5×0.2
近斜距 r_0 (m)	15122.52
方位向采样点数	8192
每个通道量化比特数 (bit)	8(I, Q)

¹ 2002-06-13 收到, 2002-10-24 改回
863-308-L-SAR 系统项目资助

L-SAR 系统安置在奖状 II 飞机上, 载机采用 LTN - 72 惯性导航系统与 DGPS 系统结合的组导航系统。飞机由惯导控制自动驾驶仪来完成自动导航。雷达的经度、纬度、高度、时间数据由 DGPS 记录。DGPS 数据和惯导数据由统一的时间基准保持同步。

飞行过程中, L-SAR 系统的运动补偿系统基于运动传感器对雷达姿态和采样频率进行控制, 对雷达的角运动误差和地速误差进行补偿, 同时根据测量结果对雷达回波信号进行补偿。

机上装载实时成像处理系统, 在飞行过程中有效地监视整个雷达系统的工作状态, 确保原始数据记录的有效性。

3 数据采集

2000 年 10 月, L-SAR 系统在山区地区进行右侧视的重复轨道干涉试验。航线是按照同一计划飞行轨道重复飞行 8 次。由于惯导作用, 真实航线是不可能精确地重复同一轨道, 即每次飞行的轨道是不同的。选择轨道基本保持平行相应雷达数据, 就有可能满足干涉成像的要求, 获得干涉成像结果。

对 8 条航线的 DGPS 记录进行分析, 相邻航线的的时间间隔为 16min。飞机的飞行速度在每条航线上稍有不同, 在 195m/s 左右。在比较小的区间中可以看作飞机是直线飞行的。飞机的预定飞行高度为 8450m, 实际上每条航线的高度稍有不同, 航线间平均高度相差最大不超过 25m, 而每条航线高度的最大方差不超过 2.6m。

按照干涉的临界基线的长度要求和分辨率单元中的高程差的要求^[8], 在假设观测地区中心为平面, 航线间是水平基线的情况下, 求得临界基线的长度大于实际航线之间的水平距离, 可知实际基线是基本满足干涉基线要求的。

4 三维成像

4.1 数据处理

要得到干涉高程图, 首先进行原始雷达数据的 SAR 单视成像处理。根据多普勒频率带宽公式可知, L-SAR 系统属于过采样。为了提高随后的数据处理速度, 在 SAR 成像处理之前低通降采样, 然后用对比度最优自聚焦算法进行单视成像处理^[9]。得到单视 SAR 复图像后, 进行干涉成像处理, 将观测同一地区的两幅雷达复图像预滤波处理^[8], 然后两幅复图像配准, 共轭求得干涉图后, 经平地相位去除^[10], 然后用边缘检测降噪法来相位滤波^[11], 接着用最小不连续法进行相位展开^[12], 最后高程反演^[10], 得到三维数字高程图。

在对真实数据的处理过程中, 使用普通的最大相关法求得配准图像, 可以发现配准复图像之间的相关度比较低, 共轭后生成的干涉条纹很少, 这种情况下, 不可能从得到的干涉相位图中反演出地形高程图来, 而在机载条件下, 飞机的轨道之间能够保持平行的概率是很小的。因而对在复图像配准的过程中, 必须要考虑到航线夹角问题。

4.2 基于局部配准的配准算法

如果两幅单视复雷达图像像素失配达到一个分辨单元的话, 那么两幅图像的相关度会降到零^[13]。在图像的配准处理中, 需要对其中的一幅图像在两个方向上进行重采样, 使两幅图像对应的像素反映的是同一目标, 从而得到两幅图像的正确相位差值, 进而获得准确的高程精度。一般的来讲, 高质量的干涉图要求图像配准精度至少达到 0.1 像素。

由轨道有夹角的航线得到的两幅雷达大面积图像中, 对应像素之间会存在一定的偏移、旋转和缩放关系, 导致相关度的下降。但是在一小块区域中, 对应图像之间的旋转和缩放作用是可以忽略不计的, 如果能够找到对应的图像区域, 那么对应同一小块区域的两幅雷达图像间会存在比较高的相关度, 从而在确定小块图像之间的配准位置, 以配准位置作为两幅图像之间的控制点, 确定控制点之间的对应关系, 从而确定两幅图像之间的相互关系。

基于以上想法, 本文提出了一种计算简单的配准方法: 基于局部配准的配准方法。在得到配准图像的同时, 可以求得轨道夹角。其处理步骤如下:

(1) 将参考图像和候选图像, 沿着长度和宽度方向分割成小块区域。如图 1 所示, 其中图 1(a) 为参考图像的分割示意图, 图 1(b) 为候选图像的分割示意图。设观测地区的参考复图像的像素大小为 $w_r \times l_r$, 候选复图像的像素大小为 $w_c \times l_c$, 而且有 $w_d = w_c - w_r > 0$, $l_d = l_c - l_r > 0$ 。

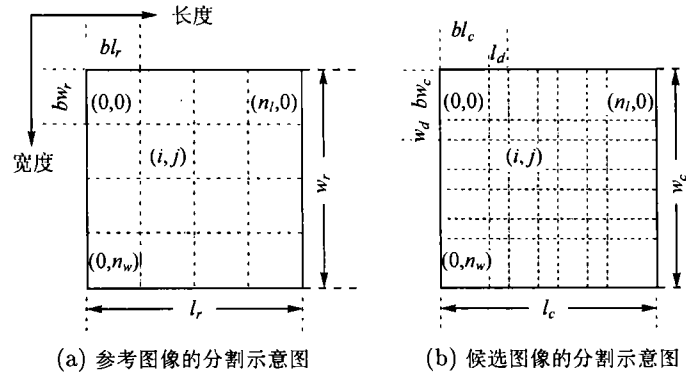


图 1 配准图像的分割示意图

将参考图像分割为 $n_w \times n_l$ 块小的区域, 则参考图像中的分块的像素大小为 $bw_r \times bl_r$, 其中 $bw_r = \lfloor w_r/n_w \rfloor$, $bl_r = \lfloor l_r/n_l \rfloor$, 而 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示下取整操作。以 (x_i, y_j) 来记录在参考图像中分块的起始位置, $x_i = i \times bl_r$, $y_j = j \times bw_r$, $i = 0, 1, \dots, n_l$, $j = 0, 1, \dots, n_w$ 。在候选图像中以同样的 (x_i, y_j) 起始位置分割图像, 但分块大小为 $bw_c \times bl_c$, 其中 $bl_c = bl_r + l_d$, $bw_c = bw_r + w_d$ 。

(2) 在候选图像的区域 (i, j) 内将对应的参考图像分块配准, 得到分块参考图像在整个候选图像的配准位置 (x'_i, y'_j) 。在这里, 将幅度相关最大值的位置认为是两幅分块图像的配准位置。在得到像素级配准位置的基础上, 然后在候选的参考图像块中, 得到配准位置的 ± 1 的像素范围内, 采用三次卷积内插法, 确定并记录 0.1 像素级别的配准位置 (x'_i, y'_j) 。

(3) 计算配准系数。有两种参数变化计算方法, 在这里都可以使用。一种是二阶多项式变换, 另一种是笛卡儿坐标变换。为计算方便和求出干涉基线夹角的考虑, 这里采用笛卡儿坐标变换, 公式如下:

$$\begin{bmatrix} a_1 & 0 & a_2 & a_3 \\ 0 & a_1 & -a_3 & a_2 \\ a_2 & -a_3 & n & 0 \\ a_3 & a_2 & 0 & n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ h \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{n-1} (x'_i x_i + y'_i y_i) \\ \sum_{i=0}^{n-1} (y'_i x_i + x'_i y_i) \\ \sum_{i=0}^{n-1} x'_i \\ \sum_{i=0}^{n-1} y'_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 $a_3 = \sum_{i=0}^{n-1} (x_i^2 + y_i^2)$, $a_2 = \sum_{i=0}^{n-1} x_i$, $a_1 = \sum_{i=0}^{n-1} y_i$, $n = n_l \times n_w$ 。

我们将配准图像位置坐标 (x'_i, y'_j) 和 (x_i, y_j) 带入上式中, 可以得到参数 a, b, h, k 。其中 $\sqrt{a^2 + b^2}$ 为图像的缩放因子, $\arctg(b/a)$ 为基线夹角, h 和 k 为两幅图像的相对偏移。

(4) 获得配准的图像。利用步骤 (3) 中求的参数可以计算参考图像在候选图像中配准位置, 公式如下:

$$\begin{cases} x' = ax - by + h \\ y' = bx + ay + k \end{cases} \quad (2)$$

得到参考图像在候选图像中的位置坐标后, 利用三次卷积内插法从参考复图像中获得配准复图像。

对轨道有夹角的航线雷达复图像使用本方法配准的过程中, 发现参考图像分块大小对两幅图像的相关度有影响。经统计, 可知分块大小在 20-100 像素之间, 可使配准后的图像相关度比较高。

图 2 显示了使用本方法的效果图。图 2(a) 为配准图像采用全局幅度相关配准后得到的干涉相位图, 图 2(b) 为采用本方法 66×66 像素分块后配准的干涉相位图。相比而言, 可以看到干涉图中相位条纹的数目已经大大的增加。

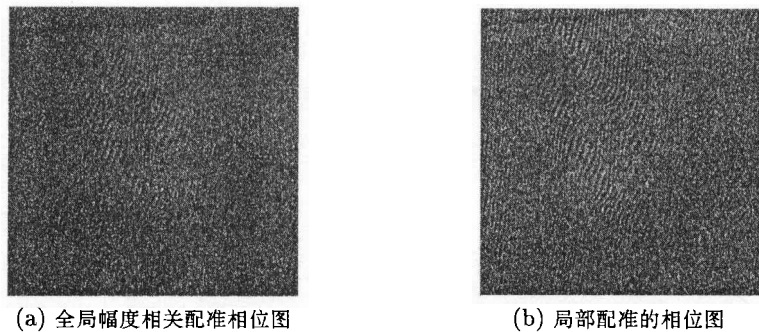


图 2 配准效果示意图

5 干涉成像结果及分析

干涉成像处理结果如图 3 所示。图 3(a) 是观测地区的雷达幅度图像。图 3(b) 是干涉相位经去除平地相位后, 相位滤波的示意图。图 3(c) 为高程反演得到的等高线图。图 3(d) 为实际地形的等高线图。可以看到两个等高线图基本吻合一致。图 3(e) 是得到的三维数字高程图。

在干涉处理求得的数字高程图中, 最低区域为右边中部的山沟部分, 相对高度为 0m; 最高区域为右上方的山头, 相对高度为 296.3m。根据比例尺为 1: 10000, 等高距为 5m 的地形图, 可知右中部山沟区域的海拔高度大约为 150.0m, 右上方最高的山头区域海拔高度为 442.3m, 求得对应相对的高度差为 292.3m。求得的数字高程图的相对高程差和实际地形图中对应区域的相对高程差, 两者的差值很小, 为 4m。两者吻合度是比较高的。

对比数字高程图和实际地形图中对应的 6 个山头, 这些地区已经用斜体大写数字标注在图 3(d) 中。采用数字高程图中相应山头周围大约 30×30m 范围内的高度平均值, 然后加上数字高程图中的 0 基准高度的真实海拔高度 150.0m, 校正得到的数字高程图中要进行对比的山头高度。同时在地形图中找到对应山头的海拔高度, 用校正后的高度值减去山头的海拔高度作为误差。比较结果见表 2, 可以看出求得的数字高程图校正后, 进行对比的 6 个山头的误差在 ±10.5m 范围内, 同实际地形的海拔高度是十分吻合的。同时得到的三维数字高程图的左下方区域, 同实际地形图比较而言, 有比较大的变化。只有对该地区进一步的实地调查才能找出变化的原因。

在同一观测地区的 8 条航线的相互干涉试验中, 只有在—对航线干涉结果吻合于实际地形图。另外有三对航线的单视复图像在滤波后可以得到比较清楚的干涉相位条纹, 但不能得到与实际地形吻合的三维地形图。其余航线对之间的复相干系数都比较小, 不能得到比较清晰的干涉条纹。从对轨道情况的分析可知, 在这次单天线重复轨道的干涉试验中, 时间去相关和飞行轨道的不稳定对两幅复图像的相关度有着决定性影响。

表 2 山头高度比较

山头编号	干涉高程图的高度 h_D (m)	实际海拔高度 H (m)	$\Delta = h_D - H$
1	352.7	344.4	8.3
2	339.2	349.6	-10.4
3	361.4	351.9	10.5
4	339.7	337.8	1.9
5	381.3	380.0	1.3
6	443.7	442.3	1.4

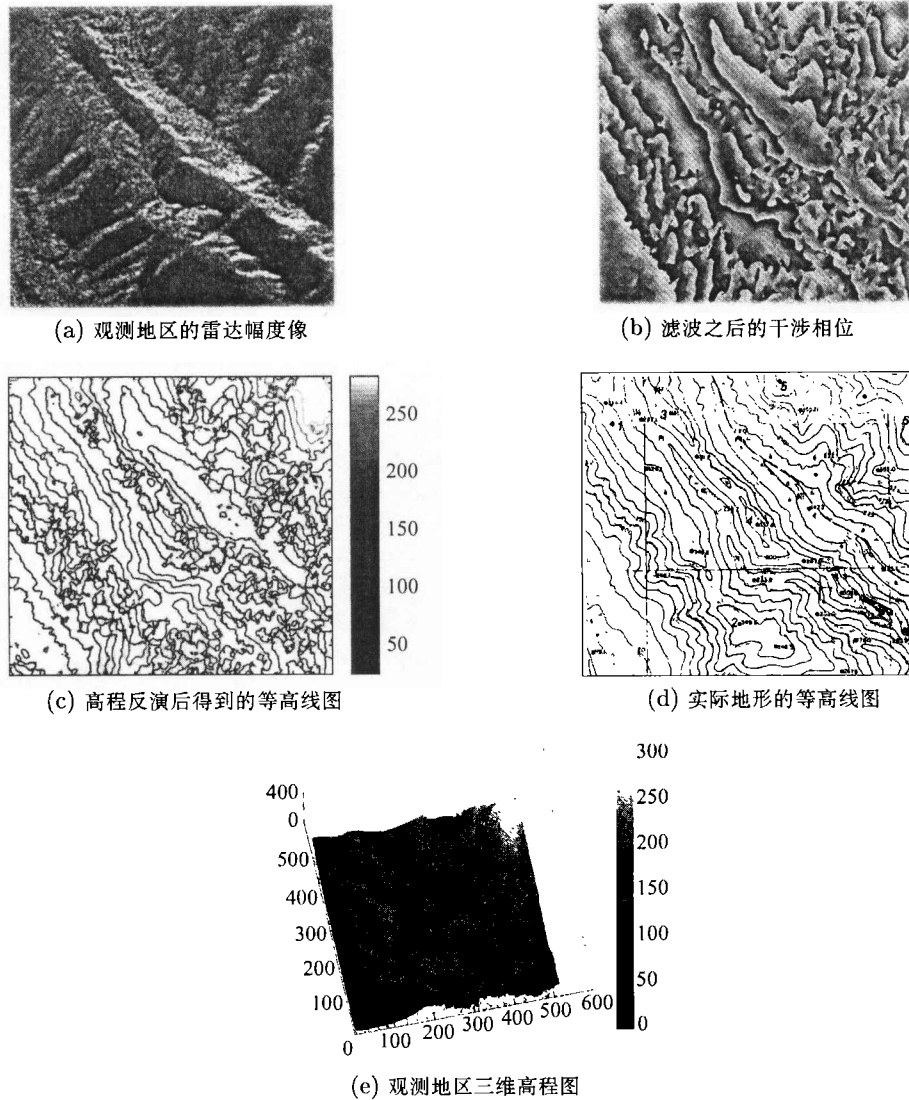


图 3 观测地区的干涉试验结果

6 结 论

本次试验的结果说明, 机载重复轨道干涉, 是很难得到干涉三维高程, 只有在数据采集时间间隔很短, 航迹轨道基本平行的情况下, 对数据进行精确成像和配准处理, 才有可能得到观测地区的三维高程图。影响重复轨道干涉成像的主要因素是航线轨道的不稳定和时间去相关因素。

参 考 文 献

- [1] L. C. Graham, Synthetic interferometer radar for topographic mapping, Proc. IEEE, 1974, 62(6), 763-768.
- [2] H. A. Zebker, R. M. Goldstein, Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations, J. Geophys. Res., 1986, 91(10), 4993-4999.

- [3] H. A. Zebker, *et al.*, The TOPSAR interferometric radar topographic mapping instrument, IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens., 1992, GRS-30(5), 933-940.
- [4] N. P. Faller, E. H. Meier, First results with the airborne single-pass DO-SAR interferometry, IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens., 1995, GRS-33(5), 1230-1236.
- [5] C. Wimmer, *et al.*, Generation of high precision DEMs of the Wadden Sea with airborne interferometric SAR, IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens., 2000, GRS-38(5), 2234-2245.
- [6] A. L. Gray, P. J. Farris-Manning, Repeat-pass interferometry with airborne synthetic aperture radar, IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens., 1993, GRS-31(1), 180-190.
- [7] A. Ulbricht, S. Reigber, Airborne repeat-pass interferometry with DLR's experimental SAR (ESAR), First result, EUSAR 98, Friedrichhafen, Germany, 1998, 241-244.
- [8] F. Gatelli, A. M. Guarnieri, *et al.*, The wavenumber shift in SAR interferometry, IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens., 1994, GRS-32(4), 855-865.
- [9] 刘月花, 高分辨率机载 SAR 信号处理研究—自聚焦算法, [硕士论文], 北京, 中国科学院电子学研究所, 2001.
- [10] C. Prati, F. Rocca, Limits to the resolution of elevation maps from stereo SAR images, Int. J. Remote Sensing, 1990, 11(12), 2215-2235.
- [11] 师瑞荣, 荆麟角, 基于边缘检测的自适应干涉 SAR 降噪算法, 遥感学报, 2003, 7(3), 190-193.
- [12] D. C. Ghiglia, M. D. Pritt, Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software, New York, John Wiley & Sons, Inc., 1998, chap.5.
- [13] E. Rodriguez, J. M. Martin, Theory and design of interferometric synthetic aperture radars, IEE Proc.-F, 1992, 139(2), 147-159.

REPEAT-PASS INTERFEROMETRY WITH AIRBORNE SYNTHETIC APERTURE RADAR

Shi Ruihong Jing Linjiao Song Fuming Shen Ting Li Jianxiong

(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract In this paper, the interferometric experiments on airborne L-SAR system of IECAS is demonstrated. And data obtained from experiments are processed, and Chinese first DEM with repeat-pass airborne SAR, which nearly accords with the real topographic map, is obtained, and its height accuracy is about 10m. A new imaging coregistration method for crossed-orbit is presented and its effectiveness is tested by airborne data.

Key words Synthetic Aperture Radar(SAR), Interferometry, Repeat-pass, Digital Elevation Model(DEM)

师瑞荣: 男, 1978 年生, 硕士生, 研究方向干涉 SAR 成像处理.
荆麟角: 男, 1941 年生, 研究员, 研究方向微波遥感技术及数字信号处理.
宋福明: 男, 1951 年生, 研究员, 研究方向机载 SAR 系统研究.
沈汀: 男, 1965 年生, 研究员, 研究方向机载 SAR 系统及运动补偿.
李健雄: 男, 1954 年生, 研究员, 研究方向机载 SAR 系统研究.